



TITLE:

複数層一括融着による多層3次元フォトニック結晶形成に関する研究(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

北野, 圭輔

CITATION:

北野, 圭輔. 複数層一括融着による多層3次元フォトニック結晶形成に関する研究. 京都大学, 2018, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2018-03-26

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21112>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

京都大学	博士（工学）	氏名	北 野 圭 輔
論文題目	複数層一括融着による多層 3 次元フォトニック結晶形成に関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、3 次元フォトニック結晶による低損失光制御の実証に向けた基盤技術として、ウエハ融着による作製手法を発展させ、高品質な 3 次元フォトニック結晶を高速に作製する技術を開発し、多層の 3 次元フォトニック結晶における光伝搬、光共振現象を実証した成果をまとめたものであって、6 章から構成される。</p> <p>光通信帯域の光の波長オーダーの周期構造を有した、立体的な人工ナノ構造である 3 次元フォトニック結晶は、一般に形成することが困難であるという課題を抱える。ウエハ融着によって作製された 3 次元フォトニック結晶によって光導波路や光共振器が実証されたものの、ウエハ融着による手法では、3 次元構造形成のために、数 10 nm レベルの高精度な位置合わせ融着積層などの、複雑かつ時間のかかる工程が層数とほぼ同回数要求されるため、実現に成功した積層数は 16 層と少なく、結果として、光導波路や光共振器における光の漏れ損失は大きなものである状況であった。16 層以上の多層の 3 次元フォトニック結晶を形成し、積層方向への光漏れ損失を抑制することを目的とし、本論文では、多周期の 3 次元構造を簡便に実現するあらたな手法を開発し、32 層の 3 次元フォトニック結晶の作製と光制御を実現した結果が述べられている。具体的には、ウエハ融着を 1 層ごとに実行し形成するこれまでの手法を発展させ、大面積の基板上へ複数層分の構造を配置し、一括してウエハ融着することで、融着回数を 1/6 以下とする簡便な構造の作製手法が開発している。また、これまでの 16 層から層数を倍とした 32 層の 3 次元フォトニック結晶と、内部への導波路、共振器の形成・実験評価した。以上の結果は、3 次元フォトニック結晶の作製法の基礎を構築し、3 次元フォトニック結晶による光制御の研究分野を大きく加速するものである。</p> <p>第 1 章は序論である。まず研究背景として、先行研究の 3 次元フォトニック結晶の形成の実施例と課題を概観した上で、大面積の基板上へ複数の 2 次元構造を配置し、2 次元構造の一括ウエハ融着工程と、分割行程を繰り返すことで構造の作製する新たな手法が提案されている。</p> <p>第 2 章では 3 次元フォトニック結晶に導入する空隙、導波路、共振器構造の光学特性について、理論検討が行われている。空隙、導波路、共振器として動作させるため、3 次元フォトニック結晶内部に面欠陥、線欠陥、点欠陥を導入した場合に形成される状態を解析されている。さらに、空隙や共振器といった 3 次元フォトニック結晶内部に形成した欠陥に対し、外部から光学測定するために配置する積層型導波路構造について明らかにされている。本手法を用いて 3 次元フォトニック結晶を形成した場合に想定される作製誤差を明確化し、作製誤差が光共振器、光導波路へ与える影響の検討がなされ、第 3 章で作製法を開発するにあたって、その許容される誤差を明確化されている。</p> <p>第 3 章では複数層の一括による 3 次元構造の形成法の開発について述べられている。最初にこれまでの作製法と新しく検討する作製法の概略について述べられ、①基板サ</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	北 野 圭 輔
<p>イズの拡大による融着の可否と②融着時の位置合わせについて検討する必要があることが示されている。①基板サイズの拡大による融着の可否について熱応力解析により検討がなされ、融着が実現可能なことを明らかにしている。加えて、②融着時の位置合わせについて、位置合わせ装置の改良と、長時間の電子線描画を施した場合でも精密に 2 次元構造を形成可能な手法の開発がなされた。実現された位置合わせの精度は第 2 章で示された許容誤差の範囲内に収まり、3 次元フォトニック結晶内の共振器へ与える影響はほとんど存在しないことと、導波路の光伝搬機能は失われないことが示された。さらに複数層一括融着において新たに必要とされる、基板表面を清浄に保ちながら、分割する手法と、基板の平行度を保ちながら研磨する手法を確立されている。以上の行程によって複数層一括融着による 3 次元フォトニック結晶の作製手法を開発されたことが述べられている。</p> <p>第 4 章では全 32 層の 3 次元フォトニック結晶を形成し、内部に形成した空隙について実験評価した結果について述べられている。具体的には第 2 章で述べた解析に基づき、内部に空隙を形成した 3 次元フォトニック結晶を形成している。空隙の光学特性を評価するため、3 次元フォトニック結晶内の空隙へ、外部から光を入出力する積層型斜め導波路を $38\mu\text{m}$ と互いの結合が十分無視できる程度大きく離して複数配置した系を構築している。このような系に、ある 1 つの導波路から光を入力したところ、空隙を介して光が伝搬する様子を観測した結果が示され、特に、$38\mu\text{m}$ と大きく離して配置した他の導波路からの光出射を観測し、全 32 層と多層構造を形成し、積層方向への伝搬損失を抑制したことによって空隙に沿った光伝搬の観測に成功したことが述べられている。実験結果に対し、理論検討した結果、実験結果と対応することを確認されている。</p> <p>第 5 章では、32 層の 3 次元フォトニック結晶を形成し、内部に形成した光導波路と光共振器について実験評価した結果について述べられている。初めに、全 32 層の 3 次元フォトニック結晶を第 4 章で述べたような空隙を挿入すること無く形成した。また、16 層形成時点で 3 次元構造を観察した場合、高精度に 3 次元構造が形成されていた。形成された 3 次元フォトニック結晶について、フォトニックバンギャップ帯域の光学特性評価した結果、透過率が測定系のノイズ (10^{-5} 以下) まで減衰することを示された。形成した導波路について、光学特性を評価した結果、透過率が 10^{-4} から 10^{-5} 程度とフォトニックバンドギャップ帯域での透過率と比較して増大し、32 層の積層導波路を介して光が導波することを示された。さらに、共振器と導波路を組み合わせた系を評価した結果、共振モードが 1 つ形成され、その光閉じ込め効果は Q 値にして 15000 と 16 層の 3 次元フォトニック結晶に形成した内部の共振器 (Q 値~1650) よりも 1 桁高い光閉じ込め効果を実証された。さらに、形成した共振器は導波路への光漏れによって性能が律速されていることを解析により明らかにし、導波路への光漏れを抑制したデバイスを開発することで、高 Q 値共振器が開発される可能性を示唆した。</p> <p>第 6 章では、本論文において得られた成果が要約されるとともに、今後の展望について述べられている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、3次元フォトニック結晶による低損失な光伝搬、光共振現象の実証に向けた基盤技術として、3次元フォトニック結晶を高速に作製する技術を開発し、多層の3次元フォトニック結晶の形成と、これによる光伝搬、光共振現象を実証した成果をまとめたものである。3次元フォトニック結晶は、一般に形成することが困難である。実際、ウエハ融着を用いて形成された3次元フォトニック結晶によって実証された光導波路や光共振器は、実現に成功した積層数が16層と十分でなく、光の漏れ損失は大きなものであった。本論文では、より多層の3次元フォトニック結晶を形成することを目的とし、3次元構造を簡便に実現する手法を開発した結果が述べられている。結果、32層と層数を倍とした3次元フォトニック結晶の形成と、導波路、共振器の導入に成功し、従来と比較して層数の増大による光閉じ込め効果の増大を明快に示している。本論文に示されている主な成果は以下のようにまとめられる。

1. 融着回数を1/6以下とする簡便な3次元構造の作製手法を開発した。特に、基板サイズの拡大による融着の可否と融着時の位置合わせについて詳細に検討がなされ、開発に成功している。
2. 全32層の3次元フォトニック結晶を形成し、内部に形成した空隙について実験評価した。その結果3次元フォトニック結晶内部の空隙を介した光伝搬の実証に成功している。
3. 32層の3次元フォトニック結晶を形成し、内部に形成した光導波路と光共振器について実験評価している。形成した光導波路について、光学特性を評価した結果、透過率が導波路形成によって増大することを示し、32層の積層導波路を介して光が導波することを示した。共振器を評価した結果、光閉じ込め効果は Q 値にして15000と16層の3次元フォトニック結晶に形成した内部の共振器(Q 値~1650)より層数が増大したことによって1桁高い光閉じ込め効果を示すことを実証した。

以上で開発した複数層一括融着による3次元フォトニック結晶の形成法は、高品質な3次元フォトニック結晶を高速に作製可能とするものであり、これまでの作製方法が抱えていた課題を克服するものであるといえる。さらに、多層の3次元フォトニック結晶における光伝搬、共振現象を実証しており、更なる層数の増加により3次元フォトニック結晶による物理限界への挑戦の可能性を創出した点も評価できる。このように、本論文は学術上、寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年2月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 年 月 日以降